Apparat und Methoden

zur

Bestimmung der magnetischen Induktion

in Eisensorten.

Inaugural-Dissertation

einer

hohen philosophischen Fakultät der Landes-Universität Rostock

zur

Erlangung der Doktorwürde

vorgelegt von

Rudolf Franke

aus Hannover.

Rostock 1896.

Druck von August Grimpe in Hannover.

Apparat und Methoden

zur

Bestimmung der magnetischen Induktion

in Eisensorten.

Inaugural-Dissertation

einer

hohen philosophischen Fakultät der Landes-Universität Rostock

zur

Erlangung der Doktorwürde

vorgelegt von

Rudolf Franke

aus Hannover.

Rostock 1896.

Druck von August Grimpe in Hannover.

Referent: Professor Dr. phil. & med. Ludwig Matthiefsen.

Meinen lieben Eltern

in Dankbarkeit

gewidmet.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41553622_0227

Inhaltsverzeichnis.

Seite

Einführung 7

I. Apparat für magnetische Messungen.

A. Theorie und Wirkungsweise des Apparates 9

B. Konstruktion des Apparates 12

II. Meſsmethoden 15

A. Für langsamen magnetischen Kreislauf, insbesondere zur Untersuchung von massiven Prüfstücken.

1) Methode mit allmählicher, stets von Anfang neu beginnender Änderung der Magnetisierung (successive Magnetisierung) 16

2) Methode mit allmählicher, vorwärtsschreitender Änderung der Magnetisierung (progressive Magnetisierung) 26

3) Methode mit gänzlicher Umkehr der Magnetisierung 27

B. Für raschen magnetischen Kreislauf, nur zur Untersuchung von sorgfältig unterteilten Prüfstücken geeignet 31

4) Methode mit konstanten Galvanometerausschlägen 32

5) Methode mit Kompensation durch eine bekannte Induktionsspule 34

6) Methode mit Kompensation durch eine bekannte elektromotorische Kraft 35

Die Technik verlangt zur Prüfung von Eisensorten auf ihre magnetische Durchlässigkeit und zur Bestimmung der bei einem magnetischen Kreisprozesse auftretenden Hysteresisverluste für den Bau von Dynamomaschinen und Transformatoren einfache Meſsmethoden, welche es gestatten, nicht allein massive Prüfstücke, sondern auch solche von beliebig dünnem Querschnitte, als Bleche und Drähte, ohne weiteres zu untersuchen.

Von den bislang bestehenden Meſsmethoden sind die auf der magnetischen Anziehung zweier Schnittflächen beruhenden, z. B. die Du Bois'sche Wage[1]), S. Thompsons Permeameter[2]), Kapps Apparat[3]) nur für die Untersuchung massiver Stäbe zu verwenden, ebenso die ballistische Methode von Hopkinson[4]) und die Prüfung mittelst Wismutspiralen von Hartmann und Braun. Die übrigen ballistischen Methoden, sowie die magnetometrische sind dagegen zur Untersuchung von Eisensorten beliebigen Querschnittes geeignet.

Die magnetometrische Methode erscheint jedoch für die Praxis ebenfalls unbrauchbar wegen der in Fabriklaboratorien durch die Bewegung groſser Eisenmassen, sowie durch das Auftreten starker elektrischer Ströme in benachbarten Leitungen der Veränderung sehr unterworfenen Intensität des erdmagnetischen Feldes. So bleiben nur einige ballistische Methoden übrig, die aber in ihrer bisherigen Anordnung zu umständlich und zeitraubend sind, und denen, obgleich sie zu den besten Methoden überhaupt zählen, doch noch einige groſse Mängel anhaften. Diese sind besonders darin zu suchen, daſs die Wiederholung einer während der ganz allmählichen Durchführung des Eisens durch den magnetischen Kreisprozeſs gemachten fehlerhaften Bestimmung der gerade bestehenden Magnetisierung für den Augenblick ausgeschlossen ist, und demnach Ablesungsfehler durch die ganze Untersuchung hindurchgeschleppt werden. Nur die von Evershed und Vignoles[5]) kürzlich angegebene Methode vermeidet diese Mängel durch

[1]) Ewing: Magnetische Induktion in Eisen und verwandten Metallen. Berlin 1892. p. 332.

[2]) Ewing, ebds. p. 236.

[3]) G. Kapp, El., London, 32 p. 498. Elektr. Ztschr. 1894, p. 264. Lum. électr. 51, p. 584.

[4]) Ewing, ebds. p. 69.

[5]) Evershed und Vignoles, El., London, 27, p. 50, 664 und 29, p. 583. Elektr. Zeitschr. 1892, p. 672.

Anwendung einer zweifachen Magnetisierungsspule, von denen die eine fortwährend von einem konstanten Strome durchflossen wird, während die andere einen Strom von entgegengesetzter Richtung, aber wechselnder Stärke enthält, so dafs nur die Differenz beider Ströme magnetisierend wirkt. Auf diese Weise vermag man das Eisen nach jeder Bestimmung durch den ganzen Magnetisierungsprozefs zu führen und eine fehlerhafte Ablesung beliebig oft zu wiederholen. Liegt hierin einerseits ein grofser Vorteil dieser Methode, so birgt anderseits die Anwendung einer doppelten Magnetisierungsspule infolge der dadurch bewirkten Streuung eine unkontrolierbare Fehlerquelle. Mit Hülfe einer kurzen Magnetnadel läfst sich nämlich, selbst wenn die Windungen der Spulen möglichst gleichmäfsig verteilt sind, das Auftreten von Polen zwischen je zwei Windungen nachweisen.

Die Untersuchung einer Eisensorte im langsamen magnetischen Kreislaufe mittelst der ballistischen Methoden ist für viele Fälle ausreichend. Nachdem jedoch die Vermutung von der Existenz der sogenannten viskosen Hysteresis, d. h. der Änderung der Hysteresisverluste infolge des Auftretens einer zeitlichen Verzögerung der magnetisierenden Kraft durch die Versuche von Hopkinson [1]), Evershed und Vignoles [2]) u. a. erwiesen ist, sind für die Praxis zur Prüfung von Eisensorten, welche einem schnellen Wechsel der Magnetisierung unterworfen sind, auch dementsprechende Mefsmethoden erforderlich.

Der lebhafte Wunsch nach Auffindung einer einfachen, korrekten Methode, welche es gestattet, Eisensorten von ganz beliebigem Querschnitte, sowohl bei langsamem, wie bei raschem magnetischen Kreislaufe zu untersuchen und dabei ohne weiteres die Bestimmung der Magnetisierung für einen gewissen Augenblick des Kreislaufes beliebig oft ausführen zu können, und welche gleichzeitig den Anforderungen der Wissenschaft und der Praxis entspricht, führten mich zur Konstruktion eines Apparates, welcher die Durchführung einer Reihe derartiger Methoden gestattet.

Die Ausarbeitung und Prüfung der Methoden wurde seit November 1894 im elektrotechnischen Institute der Technischen Hochschule zu Hannover vollzogen.

Vorliegende Abhandlung soll darüber berichten.

---

[1]) J. u. E. Hopkinson, El., London, 29, p. 510, Lum. électr. 49, p. 38, 1892. J. Hopkinson, E. Wilson u. F. Lydall, Lum. él. 48, p. 384, 1893. Elektr. Zeitschr., p. 449, 1893.

[2]) Evershed u. Vignoles, El., London, 27, p. 49 u. 29, p. 583.

I. Apparat für magnetische Messungen.

A. Theorie und Wirkungsweise des Apparates.

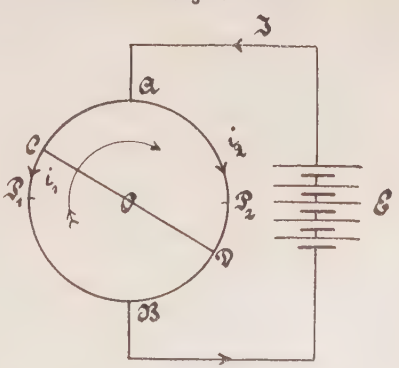
Wenn man den Grundgedanken der von Evershed und Vignoles angegebenen Methode, das Prüfstück ohne Schwierigkeiten beliebig oft durch den ganzen magnetischen Kreislauf führen und dabei fehlerhafte Beobachtungen wiederholen zu können, in anderer Weise auszuführen vermag ohne Anwendung einer doppelten Magnetisierungsspule, so hat man damit die Fehler dieser Methode beseitigt.

Diese Lösung liegt aber allein in der Anwendung eines Wechselstromes. Die von unseren Maschinen erzeugten Wechselströme haben jedoch eine so grofse Anzahl von Perioden, dafs sich massive Prüfstücke wegen der notwendig auftretenden Wirbelströme auf diese Weise nicht untersuchen lassen. Läfst man aber eine Wechselstrommaschine mit sehr geringer Tourenzahl laufen, um dadurch nur eine kleine Periodenzahl zu erhalten, so giebt sie überhaupt keinen Strom. Ich suchte daher nach einem Verfahren, einen Wechselstrom zu erzeugen, dessen Periode man über eine beliebig kurze oder lange Zeit ausdehnen könne. Dadurch wird es möglich, in irgend einer Phase stehen zu bleiben und die derselben entsprechende Stromstärke und den Grad der Magnetisierung festzustellen.

Die Anordnung von Leitern in der Art einer Wheatstone'schen Brücke bietet nun ein einfaches Mittel, Gleichströme in Wechselströme umzusetzen.

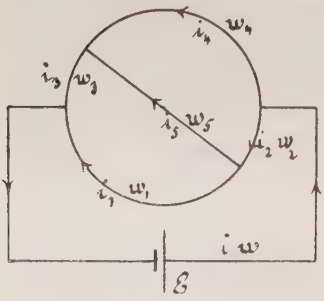
Es seien (Fig. 1) in zwei diametralen Punkten A und B eines kreisförmig geschlossenen Leiters von überall gleichem Querschnitte die Zuleitungen einer Akkumulatorenbatterie E angelegt und aufserdem ein um den Mittelpunkt O drehbarer Leiter mit diametralen Schleifkontakten C und D eingefügt. Denken wir uns zunächst den Mittelleiter herausgenommen, so wird der Strom J sich bei A in die beiden gleichen Zweigströme i_1 und i_2 zerlegen, die bei B wieder zu dem Gesamtstrome J zusammenfliefsen. Es giebt nun auf beiden Zweigleitungen je einen Punkt P_1 und P_2, welche

Fig. 1.



gleiches Potential besitzen, so dafs der dort angelegte Leiter CD stromlos bleibt. Bewegt man jetzt den Mittelleiter in der Richtung des angedeuteten Pfeiles, so entsteht in den Punkten C und D eine Potentialdifferenz, welche, sobald C auf A und D auf B gelangt, ihren gröfsten Wert annimmt. Während dieser Bewegung des Punktes C von P_1 nach A wird also ein von Null bis zu seinem Maximalwerte anwachsender Strom durch den Mittelleiter fliefsen, der auf der weiteren Bewegung von A nach P_2 wieder bis auf Null abnimmt, um dann bei der Bewegung von P_2 über B nach P_1 nochmals, jedoch in negativer Richtung, anzuwachsen und abzunehmen. Bei dieser Bewegung entsprechen die jeweiligen Stellungen des Mittelleiters den Phasen des ihn durchfliefsenden Wechselstromes, dessen Stärke sich aus den bekannten Kirchhoffschen Gleichungen der Wheatstoneschen Brücke für die einzelnen Phasen bestimmen läfst.

Fig. 2.



Es seien die Stromstärken und Widerstände der einzelnen Leiter auf die in Fig. 2 angegebene Weise bezeichnet, dann gilt für die Stromstärke des Mittelleiters

$$i_5 = \frac{(w_1 w_4 - w_2 w_3)\, E}{N},$$

wobei N ausgedrückt ist durch die Gleichung:

$$\begin{aligned} N = {} & w w_1 w_2 + w w_1 w_4 + w w_1 w_5 + w w_2 w_3 \\ & + w w_2 w_5 + w w_3 w_4 + w w_3 w_5 + w w_4 w_5 \\ & + w_1 w_2 w_3 + w_1 w_2 w_4 + w_1 w_3 w_4 + w_1 w_3 w_5 \\ & + w_1 w_4 w_5 + w_2 w_3 w_4 + w_2 w_3 w_5 + w_2 w_4 w_5 \end{aligned}$$

Es ist nun, da der ringförmige Leiter überall gleichen Querschnitt hat, daher

$$w_4 = w_1 \quad \text{und} \quad w_3 = w_2,$$

$$\begin{aligned} N = {} & w w_1 w_2 + w w_1^2 + w w_1 w_5 + w w_2^2 + w w_2 w_5 + w w_2 w_1 \\ & + w w_2 w_5 + w w_1 w_5 + w_1 w_2^2 + w_1^2 w_2 + w_1^2 w_2 + w_1 w_2 w_5 \\ & + w_1^2 w_5 + w_2^2 w_1 + w_2^2 w_5 + w_2 w_1 w_5, \end{aligned}$$

oder

$$\begin{aligned} N = {} & w (w_1^2 + 2 w_1 w_2 + w_2^2) + 2 w w_5 (w_1 + w_2) \\ & + 2 (w_1 w_2^2 + w_1^2 w_2) + w_5 (w_1^2 + 2 w_1 w_2 + w_2^2). \end{aligned}$$

Setzt man nun $w_1 + w_2 = a$, also $w_2 = a - w_1$, so wird

$$N = w a^2 + 2 w w_5 a + w_5 a^2 + 2 (a^2 w_1 - a w_1^2).$$

Läfst man den Widerstand des Hauptkreises w und den Widerstand des Mittelleiters w_5 für die Dauer einer Versuchsreihe konstant, so ist der Ausdruck $w a^2 + 2 w w_5 a + w_5 a^2 = K$ eine Konstante. Demnach wird

$$i_5 = \frac{a\,(w_1 - w_2)\,E}{K + 2\,(a^2 w_1 - a w_1^2)} = \frac{(2\,a w_1 - a^2)\,E}{K + 2\,(a^2 w_1 - a w_1^2)}.$$

Diese Gleichung, in der w_1 die einzige unabhängige Variable ist, zeigt uns, dafs der Wechselstrom i_5 für diese Anordnung die Form einer Kurve dritten Grades hat.

1. Tabelle der Stromwerte.

	Amp.		Amp.
0°	6,06	180°	— 6,06
15°	3,82	195°	— 3,82
30°	2,53	210°	— 2,53
45°	1,70	225°	— 1,70
60°	1,05	240°	— 1,05
75°	0,50	255°	0,50
90°	0,00	270°	0,00
105°	— 0,50	285°	0,50
120°	— 1,05	300°	1,05
135°	— 1,70	315°	1,70
150°	— 2,53	330°	2,53
165°	— 3,81	345°	3,81

2. Tabelle der Spannungswerte.

	Volt		Volt
0°	6,76	180°	— 6,75
15°	5,62	195°	— 5,62
30°	4,50	210°	— 4,51
45°	3,35	225°	— 3,35
60°	2,20	240°	— 2,21
75°	1,08	255°	— 1,08
90°	0,00	270°	0,00
105°	— 1,08	285°	1,08
120°	— 2,20	300°	2,20
135°	— 3,35	315°	3,35
150°	— 4,49	330°	4,50
165°	— 5,61	345°	5,61

Für $w_1 = \frac{a}{2}$ wird $i_5 = 0$,

für $w_1 = a$ wird $i_5 = \frac{a^2 \cdot E}{K}$,

für $w_1 = 0$ wird $i_5 = -\frac{a^2 \cdot E}{K}$.

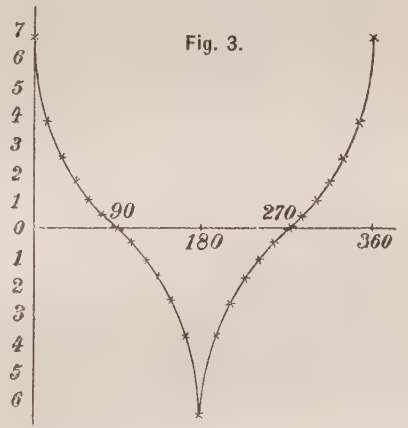


Fig. 3.

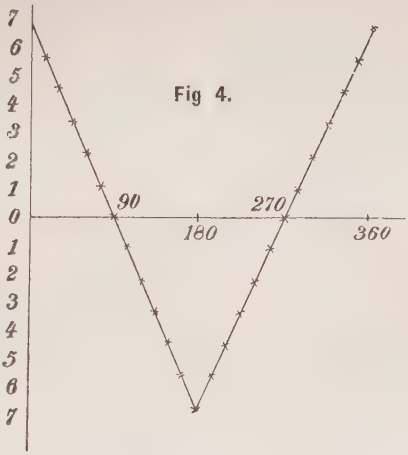


Fig 4.

Diese Wechselstromkurve besitzt für den Maximalstrom je eine Spitze und für den Strom 0 je einen Wendepunkt. Tabelle 1 giebt die durch Messung bei dem im folgenden beschriebenen Apparate

erhaltenen und in Fig. 3 dargestellten Stromwerte während einer Umdrehung. Fliefst durch den Mittelleiter kein Strom, so ist die Spannung für die einzelnen Stellungen desselben lediglich eine Funktion des Widerstandes. Die Spannungskurve ergiebt daher eine gerade Linie, wie die Tabelle 2 und Fig. 4 zeigen.

B. Konstruktion des Apparates.

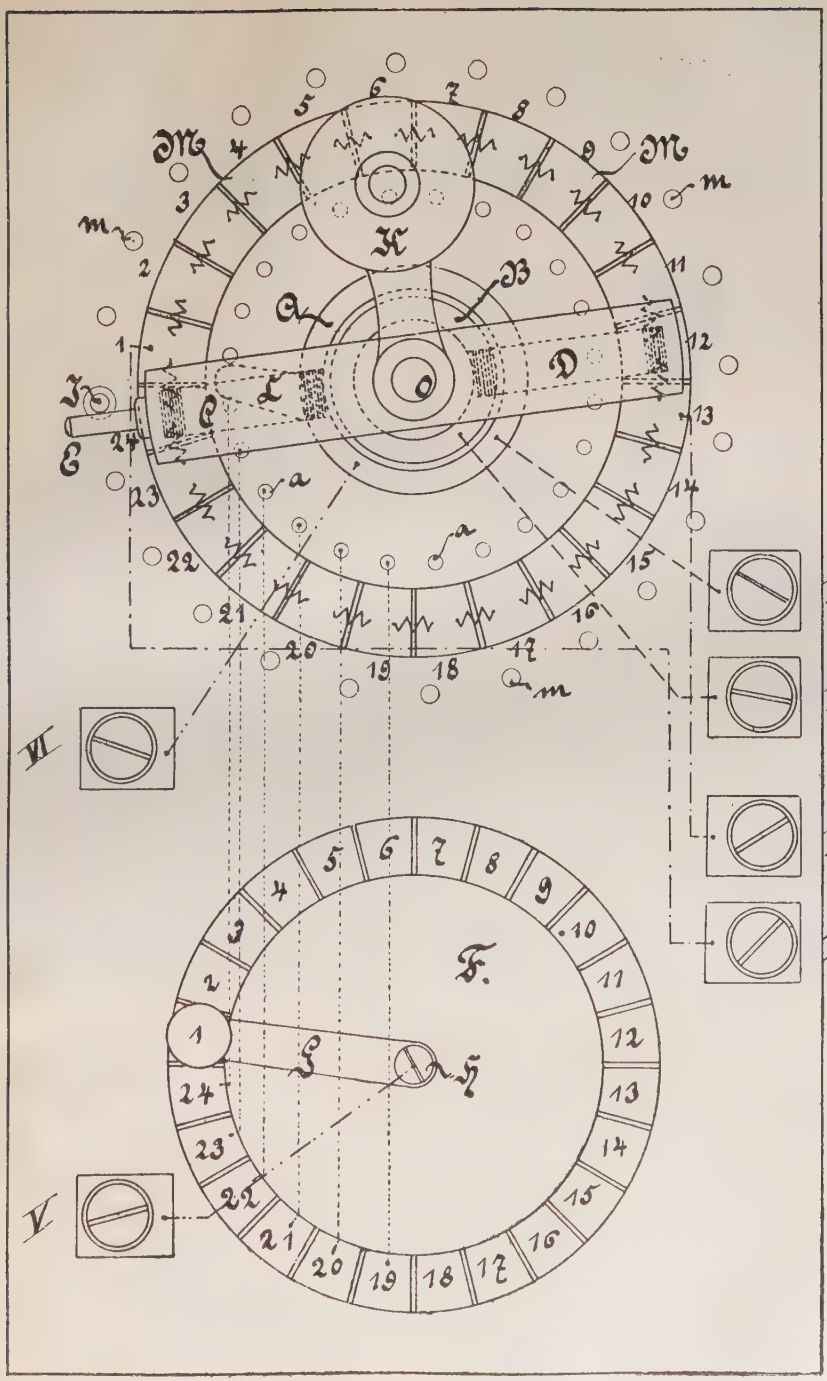
Nachdem ich im vorstehenden die grundsätzliche Wirkungsweise des Apparates, den ich kurz „Phasenrheostat“ nennen will, gekennzeichnet habe, will ich nun eine praktische Ausführung desselben, wie sie zu magnetischen Messungen Verwendung finden soll, beschreiben.

Fig. 5 giebt eine Skizze von der Konstruktion des Phasenrheostaten.

Auf einer starken Eichenholzplatte sind in einem Kreisumfange von 120 mm mittlerem Durchmesser die mit den Zahlen 1 bis 24 bezeichneten Messingsegmente *M* voneinander isoliert befestigt. Je zwei dieser Segmente sind durch einen bifilar aufgewundenen Nickelindraht von 1,5 mm Durchmesser und 1 m Länge, dessen Widerstand 0,2755 Ohm beträgt, verbunden, so dafs sämtliche 24 einen in sich geschlossenen Leiterkreis bilden. Konzentrisch zu den Segmenten sind 2 voneinander isolierte Schleifringe *A* und *B* angeordnet, welche mit den Klemmen *I* und *II* einer Gleichstrombatterie verbunden sind. Mit Hülfe zweier an einer Holzleiste befestigter Schleiffedern, *C* und *D*, von denen die eine, *C*, auf dem Ringe *A* und den Segmenten, die andere, *D*, auf dem Ringe *B* und den Segmenten der ersten Feder diametral gegenüber schleift, wird der Gleichstrom in den geschlossenen Widerstandskreis eingeleitet. Durch eine Kurbel *K*, welche bei schnellen Perioden durch eine kleine Riemscheibe ersetzt werden kann, kann man beide Federn um eine vertikale Achse 0 rotieren lassen. Segment 1 und 13 sind mit den Klemmen *III* und *IV* zur Ausleitung des Phasenstromes verbunden.

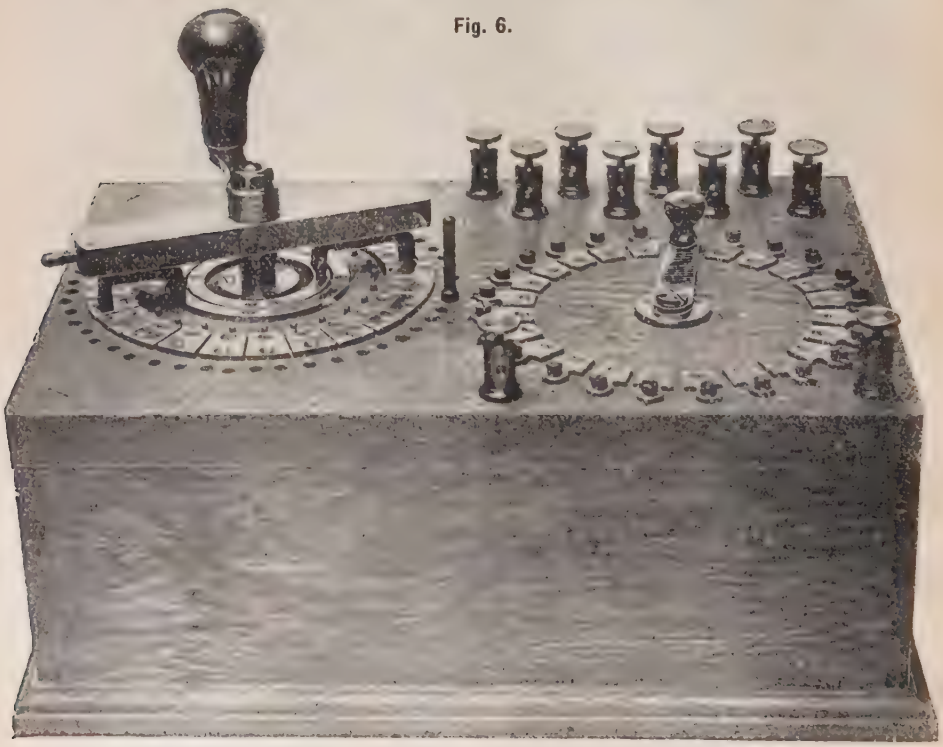
Um die Kurbel plötzlich um einen bestimmten Winkel verdrehen zu können, läfst sich ein Stift *J* der Reihe nach in eins der neben den Segmenten angebrachten Löcher *m* stecken, welcher mit Hülfe eines an der die Schleiffedern tragenden Holzleiste befestigten Anschlagstiftes *E* ein Weiterdrehen der Kurbel verhindern soll. In dieser Ausrüstung ist der Phasenrheostat zur Untersuchung von Eisenproben bei langsamem magnetischen Kreislaufe geeignet. Durch plötzliches Verdrehen der Kurbel vermag man den magnetisierenden Strom zu verändern; die Zu- oder Abnahme des Stromes während dieser Verdrehung läfst sich durch Messung der Stromstärke vor und nach derselben leicht bestimmen.

Fig. 5.



Um den Apparat nun auch brauchbar zu machen für Eisenuntersuchung bei grofser Periodenzahl, ist noch folgende Einrichtung getroffen. Auf der Innenseite der Segmente vor der Mitte eines jeden befindet sich je ein kleiner Kontaktstift *a*. Jeder dieser 24 Stifte steht mit je einem von 24 zu einem andern Kreise *F* angeordneter Messingsegmente in Verbindung. Ein um die Achse *H*, welche mit der Klemme *V* in Verbindung steht, drehbarer Kontakthebel *G* läfst sich auf irgend eins dieser Segmente einstellen und vermittelt dadurch

Fig. 6.



eine metallische Verbindung zwischen der Klemme *V* und dem betreffenden Kontaktstiftchen, auf dessen zugehöriges Segment der Hebel *G* eingestellt ist. Eine Feder *L* schleift einerseits auf den Kontaktstiftchen *a* und andererseits auf dem Metallringe *A*, welcher mit der Klemme *VI* in Verbindung steht. Auf diese Weise wird während einer Umdrehung der Kurbel *K* in dem Augenblicke, in welchem die Feder *L* das der Hebelstellung *G* entsprechende Kontaktstiftchen berührt, eine metallische Verbindung hergestellt zwischen den Klemmen *V* und *VI* und dadurch der an diese Klemmen angelegte

Sekundärkreis der Eisenuntersuchungsspule während jeder Umdrehung einmal geschlossen. Die Stellung der Feder L ist so gewählt, dafs sie eins der Kontaktstiftchen berührt, während gleichzeitig die Schleiffedern C und D von einem Stromsegmente zu einem andern übergehen und dadurch eine Stromänderung im Primärkreise bewirken. Der durch diese Stromveränderung hervorgerufene Induktionsstofs im Sekundärkreise wird also bei jeder Umdrehung nur einmal, während die Feder L über den der Hebelstellung G entsprechenden Kontaktstift hinweggleitet, verlaufen können.

Hiermit habe ich die Konstruktion des Phasenrheostaten, der natürlich noch eine Reihe anderer Ausführungsformen zuläfst, kurz beschrieben. Fig. 6 giebt eine perspektivische Ansicht desselben, die wohl ohne weiteres klar sein dürfte. Da die Phasenänderung keine stetige ist, so werden der Phasenstrom und die Spannung nicht den in Fig. 3 und Fig. 4 der Einfachheit halber gezeichneten stetigen Verlauf haben, sondern vielmehr einen stufenartigen.

II. Die Mefsmethoden.

Mit vorstehend beschriebenem Phasenrheostaten lassen sich nun folgende verschiedenen Mefsmethoden ausführen:

A. Für langsamen magnetischen Kreislauf, insbesondere zur Untersuchung von massiven Prüfstücken:
   1) Methode mit allmählicher, stets von Anfang neu beginnender Änderung der Magnetisierung (successive Magnetisierung);
   2) Methode mit allmählicher, vorwärtsschreitender Änderung der Magnetisierung (progressive Magnetisierung);
   3) Methode mit gänzlicher Umkehr der Magnetisierung.

B. Für raschen magnetischen Kreislauf, nur zur Untersuchung von sorgfältig unterteilten Prüfstücken geeignet:
   4) Methode mit konstanten Galvanometerausschlägen;
   5) Methode mit Kompensation durch eine bekannte Induktionsspule;
   6) Methode mit Kompensation durch eine konstant wirkende elektromotorische Kraft.

Die Methoden 1 bis 3 sind ballistische. Man beginnt die Untersuchung nicht mit der Magnetisierung 0, sondern mit dem gröfsten negativen Werte derselben, indem man von der gröfsten Stromstärke

des Phasenstromes ausgeht. Nach jeder einzelnen Bestimmung kann man durch einmalige Umdrehung der Kurbel des Phasenrheostaten das Eisen durch den ganzen Magnetisierungsprozefs führen, so dafs sich dasselbe alsdann wieder in demselben Grade der Magnetisierung befindet, wie vor der Bestimmung. Auf diese Weise ist es möglich gemacht, jede Ablesung beliebig oft zu wiederholen. Die Methoden 4 bis 6 gestatten ohne weiteres eine wiederholte Bestimmung, wie wir später sehen werden.

A. Methoden für langsamen magnetischen Kreislauf, insbesondere zur Untersuchung von massiven Prüfstücken.

1) Methode mit allmählicher, stets von Anfang neu beginnender Änderung der Magnetisierung (successive Magnetisierung).

Der Grundgedanke dieser Methode ist folgender: Zu Beginn der Untersuchung befindet sich das Prüfstück in der gröfsten negativen Magnetisierung, der Phasenstrom hat für die Stellung der Schleiffeder C (siehe Fig. 5) auf Segment 1 seinen gröfsten negativen Wert erreicht. Verdreht man jetzt die Kurbel plötzlich um einen Winkel φ_1, so nimmt die Stromstärke ab und ein mit der Sekundärspule des Eisenprüfstückes verbundenes ballistisches Galvanometer wird einen Ausschlag α_1 ergeben, welcher proportional ist der Abnahme der Kraftlinienzahl. Nachdem man die Anfangsstromstärke und die Stromstärke nach Umdrehung der Kurbel um den Winkel φ_1 bestimmt hat, zieht man den Stift J, welcher ein Weiterdrehen der Kurbel über den Winkel φ_1 hinaus verhinderte, aus dem Loche, dreht nun die Kurbel im Sinne des Winkels φ_1 weiter, bis die Schleiffeder C sich wieder auf dem Segmente 1 befindet. Vorausgesetzt, dafs sich die maximale Stromstärke nicht geändert hat — dieses ist eine notwendige, aber leicht zu erfüllende Bedingung bei diesen Untersuchungen — so befindet sich das Eisenprüfstück wieder in demselben Grade der gröfsten negativen Magnetisierung. Nun verdreht man die Kurbel um einen Winkel φ_2, beobachtet einen Ausschlag α_2 und so fort, indem man nach jeder Ablesung das Eisen durch den ganzen magnetischen Kreislauf führt und vom Segmente 1 aus den Winkel φ mifst. Nach einer Verdrehung um $\varphi = 180^0$ befindet sich die Schleiffeder C auf Segment 13, der Strom hat seinen höchsten positiven Wert erhalten, das Eisen besitzt seine gröfste positive Kraftlinienzahl, für $\varphi = 180^0$ ist also auch α ein Maximum geworden.

Zur Aufnahme des absteigenden Astes der Magnetisierungskurve verfährt man nun umgekehrt, indem man jetzt den Winkel φ von Segment 13 ab mifst und nach jeder Messung die Kurbel auf diese

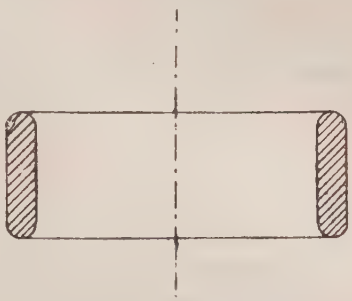
Stellung herumdreht. Die in einer Stromphase φ bestehende Magnetisierung ist nun proportional der Hälfte des maximalen ballistischen Ausschlages vermindert um den Ausschlag α, welcher der Abnahme an Kraftlinien während der Verdrehung um φ entspricht,

$$\text{also } \beta = \frac{\alpha_{max}}{2} - \alpha.$$

Die Gesamtzahl der Kraftlinien, welche die Sekundärspulen durchsetzten, ist dann $N = G \cdot \beta$, wo G die Galvanometerkonstante bedeutet.

G habe ich bei meinen Versuchen mit Hülfe einer bekannten Induktionsspule bestimmt, welche folgendermafsen konstruiert war. Auf einen aus Kartenpapier gewickelten, kernförmigen Ring von 10 cm mittlerem Durchmesser, 30 mm Breite und 5 mm Dicke, der die in Fig. 7 angegebene Form hat, wurden in 4 Lagen 512 Windungen eines umsponnenen Kupferdrahtes von $1^1/_2$ mm Durchmesser möglichst sorgfältig aufgewickelt und zwar derartig, dafs nach Vollendung je einer Lage die an der Aufsenseite des Ringes liegenden Zwischenräume mit Siegellack ausgefüllt wurden, damit die darüberliegenden Windungen sich nicht einzudrücken vermochten. Über diesen Primärwindungen wurde dann die Sekundärspule von 1000 Windungen möglichst gleichmäfsig auf dem ganzen Ringe verteilt.

Fig. 7.



Es sei nun Z_1 die Anzahl der Primärwindungen, z_1 die Anzahl der Sekundärwindungen, q_1 der mittlere Spulenquerschnitt, l_1 die Spulenlänge, so ist die gesamte Anzahl aller von 1 Amp. Stromstärke erzeugten Kraftlinien $\frac{4\pi Z_1}{10 l_1} \cdot q_1$.

Ist R_1 der Widerstand des Sekundärkreises mit Einschlufs des Galvanometers, so ist die gesamte Elektrizitätsmenge, welche einen Ausschlag γ erzeugt, $\frac{4\pi Z_1 z_1}{10 l_1 \cdot R_1} \cdot q_1$, also die Elektrizitätsmenge für einen Grad Ausschlag $Q_1 = \frac{4\pi Z_1 z_1}{10 l_1 \cdot R_1} \cdot \frac{q_1}{\gamma}$.

Erhalten wir infolge irgend einer magnetischen Änderung N in der Prüfspule bei z_2 Sekundärwindungen und einem Widerstande R_2 des Sekundärkreises einen ballistischen Ausschlag β, so ist die Elektrizitätsmenge, welche diesen Ausschlag erzeugt hat:

$$\frac{N \cdot z_2}{R_2} = Q_1 \beta = \frac{4\pi Z_1 z_1 q_1}{10 l_1 \cdot R_1 \gamma} \cdot \beta,$$

daraus folgt:

$$N = G \cdot \beta = \frac{4\pi Z_1 z_1 q_1 R_2}{z_2 \cdot 10 l_1 R_1 \gamma} \cdot \beta.$$

Ist q_2 der Querschnitt des Eisens, so ist die Anzahl der Kraftlinien pro qcm Querschnitt

$$B = \frac{N}{q_2} = \frac{G \cdot \beta}{q_2} = \frac{4\pi Z_1 z_1 q_1 R_2}{z_2 \cdot 10 l_1 \cdot R_1 \cdot \gamma q_2} \cdot \beta.$$

Die Feldstärke für die Eisenspule ist aber

$$H = \frac{4\pi Z_2 i}{10 l_2}.$$

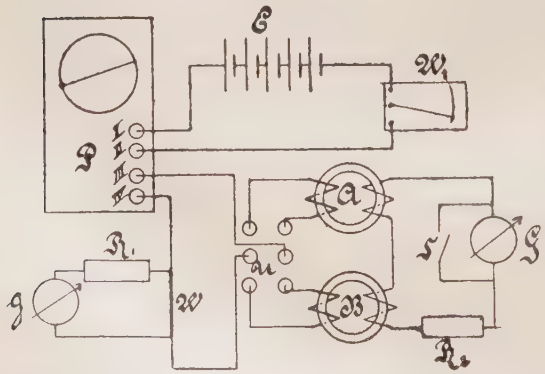
Daraus ergiebt sich die Permeabilität

$$\mu = \frac{B}{H}.$$

Im folgenden gebe ich nun kurz das Beispiel eines nach vorstehender Methode durchgeführten Versuches, dessen Anordnung aus Fig. 8 ersichtlich ist.

An die Gleichstromklemmen *I* und *II* des Phasenrheostaten *P* ist eine Akkumulatorenbatterie *E* nebst Rheostaten W_1 geschaltet. Der Phasenstrom wird von den Klemmen *III* und *IV* durch einen bekannten Widerstand *W* von $\frac{1}{10}$ Ω, an dessen Enden ein Spiegelgalvanometer *g* nebst Stöpselrheostaten R_1 zur Strommessung angelegt ist, zu dem Umschalter *U* geleitet, um von hier aus entweder durch die bekannte Induktionsspule *A* oder durch die Eisenprüfspule *B* zu fliefsen. Die Sekundärwindungen beider Spulen sind mit dem ballistischen Galvanometer *G* und dem Stöpselrheostaten R_2 zu einem Stromkreise verbunden. Ein Schlüssel *S* gestattet, das Galvanometer kurz zu schliefsen.

Fig. 8.



Als Eisenprüfspule verwendete ich ebenfalls die in Fig. 7 dargestellte Form, um die Kraftlinienverteilung über den ganzen Eisenquerschnitt möglichst gleichmäfsig zu gestalten. Ein gut ausgeglühter

Eisendraht von 0,5 mm Durchmesser wurde auf einer hölzernen Form in 403 Windungen zu einem Ringe von 10 cm mittlerem Durchmesser, 30 mm Breite und 5 mm Dicke aufgewickelt und dabei jede Windung schellackiert und jede Lage von der andern durch Papier isoliert. Nach Umhüllung des Ringes mit Isolierband wurde dann genau wie bei der oben beschriebenen Induktionsspule die Primärwickelung von 512 Windungen in 4 Lagen und darüber die Sekundärwickelung in 100 Windungen angebracht. Der Gesamtquerschnitt des Eisens war nun $q_2 = 403 \cdot \frac{(0{,}5)^2 \pi}{4} = 0{,}79$ qcm, der mittlere Querschnitt der Primärspule $q_2^1 = 5{,}37$ qcm. Da die Sekundärspule nicht direkt auf den Eisenring gewickelt war, so gingen $(q_2^1 - q_2)\, H$ Kraftlinien aufserhalb des Eisens durch die Sekundärspule. Dieses Korrektionsglied mufste von N abgezogen werden, um die wirkliche Induktion B zu erhalten.

Also

$$B = \frac{N - (q_2^1 - q_2)\, H}{q_2}$$

$$B = \frac{N}{q_2} - \frac{(q_2^1 - q_2)\, H}{q_2} = \frac{4\pi Z_1 z_1 q_1 R_2}{z_2 \cdot 10 l_1 \cdot R_1 \gamma q_2} \cdot \beta - \frac{(q_2^1 - q_2)\, H}{q_2}.$$

Als ballistisches Galvanometer verwendete ich ein Deprez-Galvanometer mit beweglicher Spule von 198,4 Ω Widerstand, dessen Schwingungsdauer von 0,6 Sek. durch einen auf den Spulenrahmen aufgesetzten Drahtbalken von 145 mm Länge nebst angehängten Bleigewichten von 36 Gramm auf eine Schwingungsdauer von 4,2 Sekunden erhöht wurde. Dieses Galvanometer hat sich als aufserordentlich praktisch erwiesen, es ist vollständig frei von den im hiesigen Institute infolge der elektrischen Strafsenbahn auftretenden starken Störungen durch Erdströme, besitzt die genügende Empfindlichkeit von 0,0000057 für 1^0 Ausschlag bei 2 m Skalenentfernung und hat den Vorteil, sobald die Klemmen kurz geschlossen werden, infolge der dann auftretenden starken Dämpfung nach etwa 30 Sekunden still zu stehen. Es ist jedoch darauf zu achten, dafs nach Beendigung jeder Ablesung das Galvanometer so lange kurz geschlossen bleibt, bis die Kurbel des Phasenrheostaten wieder in die Anfangsstellung zurückgedreht ist, damit nicht der ganze Induktionsstrom durch das Galvanometer verlaufen kann.

Der Gang des Versuches war nun folgender. Nach Schliefsung des Gleichstromkreises, wobei die Kurbel des Phasenrheostaten für die Maximalstromstärke in die Stellung 1 (siehe Fig. 5) gebracht war, wurde mittels des Umschalters U (Fig. 8) zunächst der Strom

durch die Induktionsspule A geleitet. Nach Bestimmung der Stromstärke durch das geaichte Spiegel-Galvanometer g wurde die Kurbel des Phasenerzeugers um einen bestimmten Winkel verdreht, der Ausschlag γ am ballistischen Galvanometer beobachtet und nach Schliefsung des Schlüssels S die Stromstärke für diese Stellung der Kurbel bestimmt. Der aus drei Versuchen bei ungeändertem Widerstande des Sekundärkreises beobachtete Mittelwert ergab einen Ausschlag des ballistischen Galvanometers pro Amp. Stromänderung von $\gamma = 3{,}56^0$. Hiernach wurde mit der Eisenuntersuchung begonnen, nachdem der Umschalter auf die Eisenprüfspule umgelegt und die Kurbel auf die Maximalphase eingestellt war.

Um die Abnahme der Stromstärke infolge der Temperaturzunahme der Primärspule zu bestimmen, liefs ich zunächst den Maximalstrom während 20 Minuten durch die Primärspule fliefsen, bestimmte die Stromstärke, unterbrach den Strom während 5 Minuten gänzlich und bestimmte die Stromstärke wieder. Die gemessenen Stromstärken waren 6,040 und 6,066 Amp., also ein Unterschied von 0,026 auf 6 Amp., d. h. ein Fehler, der kleiner als $\frac{1}{2}$ % ist und vernachlässigt werden kann.

Der Anschlagstift J wurde nun bei Segment 2 eingesteckt und die Stromstärke i für die Maximalphase bestimmt. Nach Öffnung des Schlüssels S erfolgte sodann die plötzliche Verdrehung der Kurbel von Segment 1 auf Segment 2, wobei der ballistische Ausschlag α beobachtet wurde. Hierauf wurde der Schlüssel S wiederum geschlossen, die dem Segment 2 entsprechende Stromstärke festgestellt, der Stift J gezogen und die Kurbel ganz herumgedreht bis in die Anfangslage 1. Bei dem zweiten Versuche wurde die Kurbel bis Segment 3 plötzlich verdreht und so fort bis zu Segment 13, wobei nach jedem Versuche die Kurbel ganz herum- auf Segment 1 zurückgedreht wurde. Da in der Stellung 13 wiederum die gröfste Stromphase herrscht, so wurde nun diese Stellung als Ausgangspunkt gewählt und der Versuch sonst in genau derselben Weise weitergeführt. Die Bestimmungen wurden für jede Stromphase dreimal gemacht und das Mittel genommen. Der Widerstand des Sekundärkreises blieb unverändert. Bei einer Versuchsreihe erhielt ich nun folgende Resultate:

Es war

$Z_1 = Z_2 = 512$	$q_1 = q_2^1 = 5{,}37$ qcm
$z_1 = 1000$	$R_2 = R_1$
$l_1 = l_2 = 31{,}4$ cm	γ für 1 Amp. $3{,}56^0$
$z_2 = 100$	$q_2 = 0{,}79$ qcm.

$$B = \frac{4\pi \cdot 512 \cdot 1000 \cdot 5{,}37}{100 \cdot 10 \cdot 31{,}4 \cdot 3{,}56 \cdot 0{,}79} \cdot \beta - \frac{(5{,}37 - 0{,}79)\, H}{0{,}79}$$

$$B = 392 \cdot \beta - 5{,}8 \cdot H$$

$$H = \frac{4\pi \cdot z_2 \cdot i}{10 l_2} = \frac{4\pi \cdot 512 \cdot i}{10 \cdot 31{,}4} = 20{,}48\, i$$

$$\mu = \frac{B}{H}.$$

Tabelle 3.

Nr.	α	$\beta = \frac{\alpha_m}{2} - \alpha$	H	B	μ
1	2,8	— 48,2	— 78,2	— 18450	
2	4,9	— 46,2	— 51,7	— 17800	
3	7,7	— 43,4	— 34,9	— 16800	
4	11,0	— 40,1	— 21,4	— 15580	
5	16,0	— 35,1	— 10,3	— 13750	
6	26,0	— 25,1	0	— 10900	
7	79,0	+ 27,9	10,3	9800	952
8	88,1	37,0	21,5	14380	669
9	93,0	41,9	34,9	16300	467
10	96,2	45,1	51,7	17400	337
11	99,0	47,9	78,1	18350	235
12	102,2	51,1	124,0	19300	156
13	— 2,9	48,4	78,1	18550	
14	— 5,0	46,3	51,6	17900	
15	— 7,8	43,5	34,9	16900	
16	— 11,0	40,3	21,5	15680	
17	— 16,0	35,3	10,2	13790	
18	— 26,0	25,3	0	10900	
19	— 79,2	— 27,8	— 10,3	— 9860	957
20	— 88,5	— 37,1	— 21,6	— 14380	666
21	— 93,5	— 42,1	— 35,0	— 16300	466
22	— 96,4	— 45,0	— 51,7	— 17400	337
23	— 98,8	— 47,8	— 78,1	— 18350	235
24	— 102,2	— 51,1	— 124,1	— 19300	156

Die gefundenen Werte sind in vorstehender Tabelle eingetragen. Für den gröfsten Ausschlag $\beta = 51{,}1$ Skalenteile, gemessen in Doppelmillimetern bei 2 m Skalenentfernung, war die Stromänderung $i = 6{,}06$ Amp., daher

$$H = 20{,}48 \cdot 6{,}06 = 124$$

$$B = 392 \cdot 51{,}1 - 5{,}8 \cdot 124 = 19300$$

$$\mu = \frac{B}{H} = 156.$$

Fig. 9.

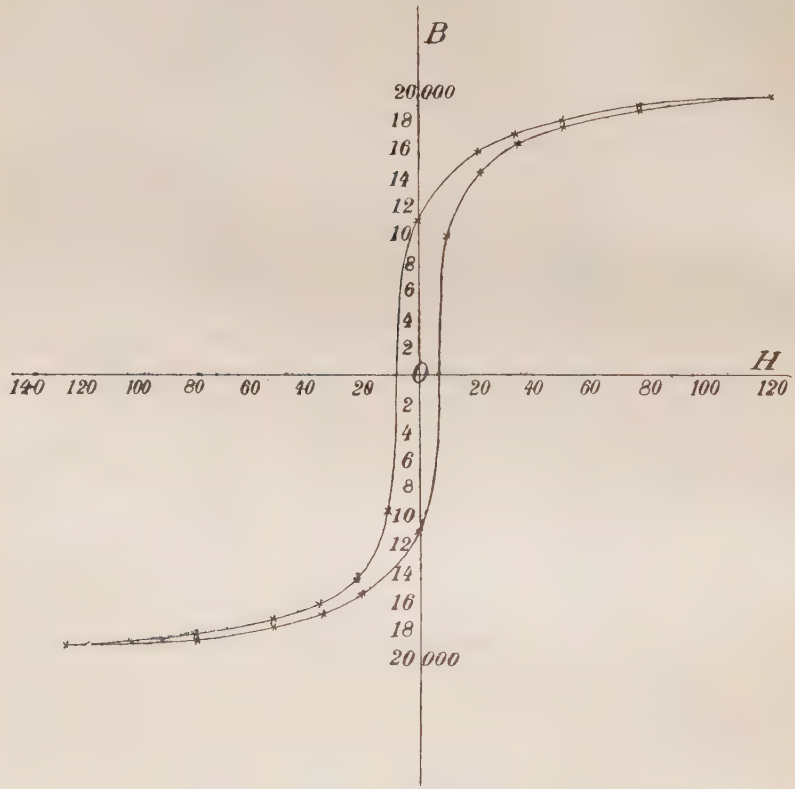


Fig. 9 stellt die erhaltene Magnetisierungskurve dar.

Auf dieselbe Methode habe ich nun ferner einen aus hartem Stahldraht und einen aus ausgeglühtem Stahldraht gewickelten Ring untersucht.

Der Stahldraht hatte in beiden Fällen einen Durchmesser von 0,53 mm. Der erstere Ring von hartem Stahldraht hatte 442 Windungen, also einen Gesamtquerschnitt von

$$q_1 = 442 \cdot \frac{(0{,}53)^2 \pi}{4} = 0{,}972 \text{ qcm.}$$

Es folgt daraus bei obigen Primär- und Sekundärwindungen

$$B = 319 \cdot \beta - 4{,}5 \cdot H.$$

Tabelle 4.

Nr.	α	$\beta = \frac{\alpha_m}{2} - \alpha$	H	B	μ
1	3,2	— 48,6	— 77,5	— 15150	
2	6,1	— 45,7	— 52,1	— 14340	
3	9,0	— 42,8	— 34,6	— 13490	
4	13,2	— 38,6	— 21,3	— 12200	
5	16,8	— 35,0	— 10,1	— 11100	
6	24,1	— 27,7	0	— 8830	
7	50,9	— 0,9	10,1	— 241	
8	79,4	27,6	21,4	8700	407
9	88,7	36,9	34,6	11590	335
10	94,0	42,2	52,1	13210	254
11	98,8	47,0	77,5	14650	189
12	103,5	51,8	122,0	15950	131
13	— 3,0	48,8	77,5	15250	
14	— 6,0	45,8	52,1	14380	
15	— 10,5	41,3	34,7	13020	
16	— 13,5	38,3	21,3	12100	
17	— 16,5	35,3	10,1	11190	
18	— 23,6	28,2	0	9000	
19	— 51,0	0,8	— 10,1	205	
20	— 79,5	— 27,7	— 21,5	— 8733	407
21	— 88,8	— 37,0	— 34,7	— 11640	336
22	— 94,2	— 42,4	— 52,1	— 13260	255
23	— 99,0	— 47,2	— 77,5	— 14690	190
24	— 103,5	— 51,8	— 122,0	— 15950	131

Der zweite Ring von ausgeglühtem Stahldraht hatte 448 Windungen mit einem Querschnitte

$$q_1 = 448 \cdot \frac{(0{,}53)^2 \pi}{4} = 0{,}988 \text{ qcm},$$

also

$$B = 316 \cdot \beta - 4{,}43 \cdot H.$$

Die Tabellen 4 und 5 geben die Resultate der Beobachtungen. Fig. 10 stellt die Magnetisierungskurve für den harten, Fig. 11 die für den ausgeglühten Stahldraht dar. Auch diese Resultate geben die Mittelwerte aus je drei Beobachtungen für jeden Punkt der Magnetisierungskurve.

Tabelle 5.

Nr.	α	$\beta = \frac{\alpha_m}{2} - \alpha$	H	B	μ
1	3	— 55,7	— 77,4	— 17260	
2	5,1	— 53,6	— 52,0	— 16670	
3	8,8	— 49,9	— 34,6	— 15650	
4	13,4	— 45,3	— 21,5	— 14200	
5	16,3	— 42,4	— 10,0	— 13350	
6	23,4	— 35,3	0	— 11200	
7	69,0	10,3	9,95	3200	322
8	98,1	39,4	21,5	12330	574
9	104,9	46,2	34,8	14460	416
10	110,1	51,4	52,0	16000	308
11	114,0	55,3	77,4	17100	221
12	117,4	58,7	121,0	18010	149
13	— 3	55,7	77,4	17260	
14	— 5,2	53,5	52,0	16670	
15	— 8,8	49,9	34,6	15650	
16	— 12,9	45,8	21,5	14400	
17	— 16,0	42,7	10,0	13450	
18	— 23,4	35,3	0	11150	
19	— 69,1	10,4	— 9,94	— 3240	326
20	— 97,9	— 39,2	— 21,5	— 12300	572
21	— 104,8	— 46,1	— 34,6	— 14420	417
22	— 110,1	— 51,8	— 52,0	— 16000	308
23	— 114,0	— 55,3	— 77,4	— 17150	222
24	— 117,5	— 58,8	— 121,5	— 18000	149

Fig. 10.

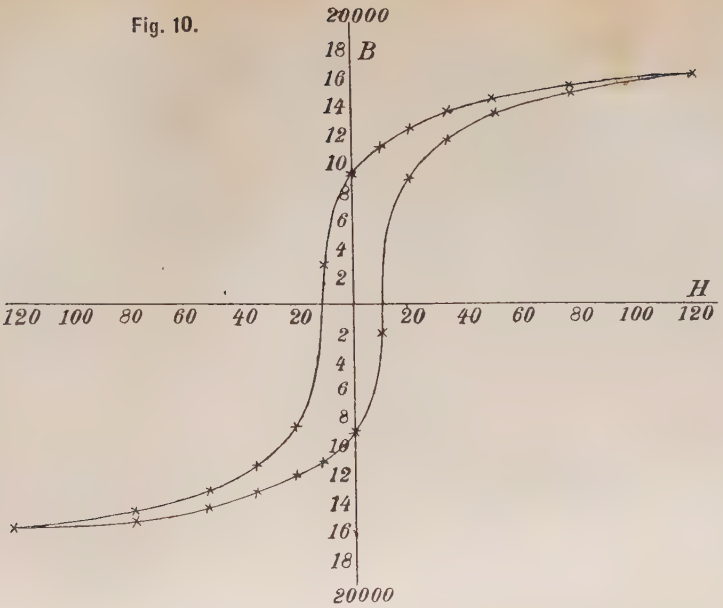
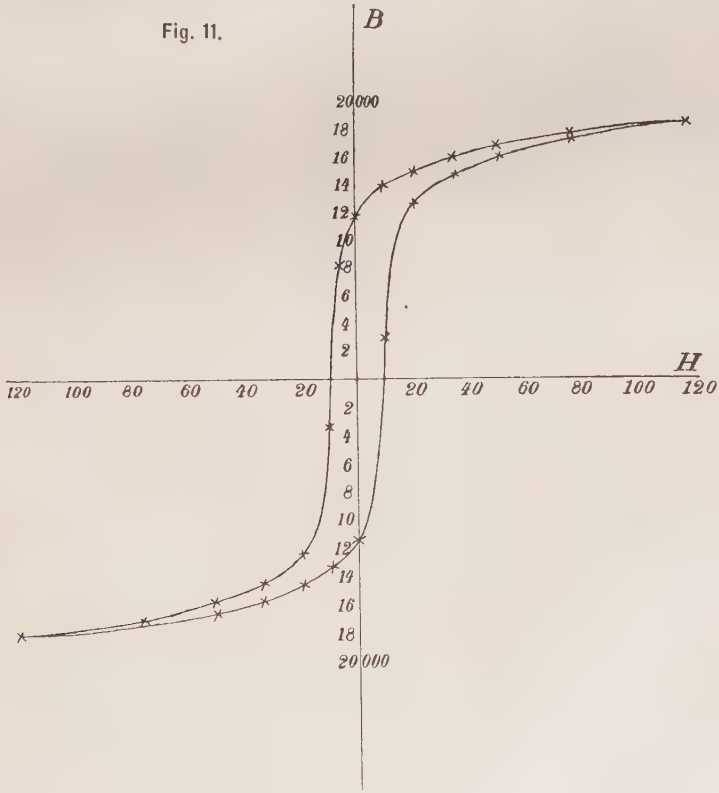

B
H
20000
18
16
14
12
10
8
6
4
2
120 100 80 60 40 20
20 40 60 80 100 120
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20000

Fig. 11.


B
H
20000
18
16
14
12
10
8
6
4
2
120 100 80 60 40 20
20 40 60 80 100 120
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20000

2) Methode mit allmählicher, vorwärtsschreitender Änderung der Magnetisierung (progressive Magnetisierung).

Diese Methode ist fast dieselbe, wie sie Ewing zur Anwendung gebracht hat, nur mit dem Unterschiede, dafs man hier jede Ablesung beliebig oft wiederholen kann. Die Versuchsanordnung bleibt dieselbe wie bei der vorstehend beschriebenen. Bei der Ausführung des Versuches geht man (siehe Fig. 5) von Segment 1 aus und beobachtet

Tabelle 6.

Nr.	α	$\sum \alpha$	$\beta = \frac{1}{2}\sum_{\varphi=0}^{\varphi=180^0}\alpha - \sum_{\varphi=0}^{\varphi=\varphi}\alpha$	H	B	μ
1	2,7	2,7	— 48,7	— 78,3	— 18650	
2	2,2	4,9	— 46,5	— 52,1	— 17930	
3	2,6	7,5	— 43,9	— 34,8	— 17000	
4	3,5	11,0	— 40,4	— 21,5	— 15720	
5	5,0	16,0	— 35,4	— 10,5	— 13810	
6	10,1	26,1	— 25,3	0	— 9830	
7	53,9	80,0	28,6	10,5	11140	1065
8	8,8	88,8	37,4	21,5	14540	677
9	4,8	93,6	42,2	35,0	16330	467
10	3,4	97,0	45,6	52,3	17580	336
11	2,8	99,8	48,4	78,4	18550	237
12	2,9	102,7	51,4	124,2	19430	157
13	— 2,7	100,0	48,6	78,4	18600	
14	— 2,3	97,7	46,3	52,0	17850	
15	— 2,5	95,2	43,8	34,8	16990	
16	— 3,5	91,7	40,3	21,5	15680	
17	— 5,2	86,5	35,1	10,4	13700	
18	— 10,0	76,5	25,1	0	9810	
19	— 53,9	22,6	— 28,8	— 10,4	— 11220	1070
20	— 8,8	13,8	— 37,6	— 21,6	— 14600	676
21	— 4,8	9,0	— 42,4	— 35,0	— 16420	469
22	— 3,4	5,6	— 45,8	— 52,1	— 17670	340
23	— 2,8	2,8	— 48,6	— 78,4	— 18600	237
24	— 2,9	— 0,1	— 51,5	— 124,0	— 19480	157

den Ausschlag infolge der Stromänderung bei Verdrehung der Kurbel von Segment 1 auf Segment 2, dreht danach die Kurbel ganz herum bis auf Segment 2, bestimmt den Ausschlag infolge der Stromänderung von Segment 2 auf Segment 3 u. s. w. Die gesamte Abnahme bezw. Zunahme an Kraftlinien für eine Stromphase φ wird dann erhalten durch Addition aller vorhergehenden, den einzelnen Stromänderungen entsprechenden Ausschläge. Die in dieser Stromphase φ bestehende Magnetisierung ist jedoch proportional der Hälfte der Gesamtsumme aller Ausschläge von $\varphi = 0$ bis $\varphi = 180^0$ vermindert um die Summe der Ausschläge, welche der Stromphase φ entspricht, also

$$\beta = \tfrac{1}{2} \cdot \sum_{\varphi\ 0}^{\varphi = 180^0} \alpha - \sum_{\varphi\ 0}^{\varphi = \varphi} \alpha.$$

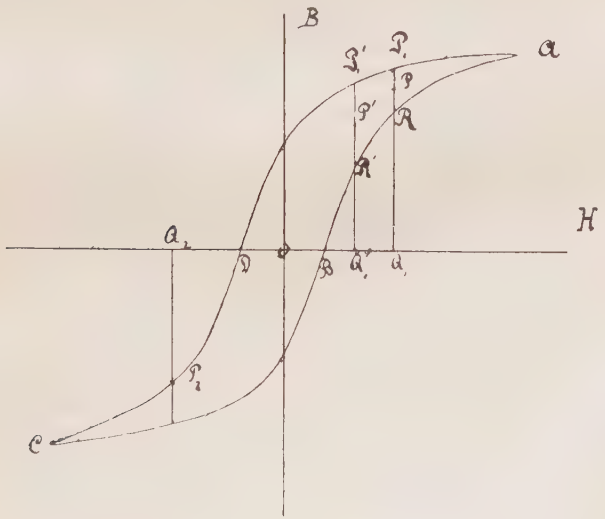
Bei einem in dieser Weise durchgeführten Versuche wurde der frühere Eisenring wieder benutzt, nachdem derselbe durch ganz allmählich abnehmenden Wechselstrom entmagnetisiert war. Vorstehende Tabelle 6 zeigt, dafs die erhaltenen Werte mit den bei der vorigen Methode gefundenen gut übereinstimmen.

3) Methode mit gänzlicher Umkehr der Magnetisierung.

Diese Methode läfst zwei verschiedene Ausführungen zu.

a. Wenn man von einem Punkte P_1 der Magnetisierungskurve aus den Strom, welcher proportional ist der Abscisse OQ_1, umkehrt, so gelangt man, da $OQ_2 = OQ_1$ ist, zu einem Punkte P_2 der Kurve.

Fig. 12 a.



Hierbei erhält man einen ballistischen Ausschlag α, welcher den Wert der Summe $P_1 Q_1 + Q_2 P_2$ darstellt. Die Hälfte dieses Ausschlages würde proportional sein einer Ordinate $PQ_1 = \frac{P_1 Q_1 + Q_2 P_2}{2}$. Daraus folgt aber, weil wegen der Symmetrie der beiden Äste der Magnetisierungskurve $P_2 Q_2 = R Q_1$ ist, dafs $P_1 P = PR$ ist, oder mit anderen Worten, dafs P den Halbierungspunkt der zwischen dem oberen und unteren Aste der Magnetisierungskurve liegenden Ordinaten darstellt. Führt man nun das Eisen von dem Punkte P_2 durch den ganzen Magnetisierungsprozefs hindurch, wobei die Maximalstromstärke dieselbe bleibt, bis zu dem Punkte P_1^1 und wendet hier plötzlich den Strom um, so erhält man die dem Ausschlag $\frac{\alpha}{2}$ proportionale Ordinate $Q_1^1 P^1$, wobei P^1 wiederum den Halbierungspunkt der Ordinate $P_1^1 R_1$ darstellt. Fährt man in dieser Weise fort, indem man nach jeder Bestimmung das Eisen bei derselben Maximalstromstärke durch den ganzen Magnetisierungsprozefs führt, so ergeben die Punkte P eine Kurve, welche die Mitten sämtlicher von der Hysteresisschleife eingeschlossenen Ordinaten miteinander verbindet, d. h. eine Kurve der mittleren Magnetisierung.

Tabelle 7.

Nr.	α	$\beta = \frac{\alpha}{2}$	H	B	μ
1	102,0	51,0	124,2	19270	155
2	96,1	48,0	78,26	18350	237
3	91,0	45,5	51,93	17550	338
4	85,2	42,6	34,82	16500	475
5	77,1	38,6	21,48	15000	698
6	63,2	31,6	10,4	12320	1184
7	0,4	0,2	0	78,4	- -
8	63,2	31,6	10,5	12320	1175
9	77,2	38,6	21,5	15000	698
10	84,9	42,5	35,0	16450	470
11	90,8	45,4	51,9	17500	337
12	96,0	48,0	78,42	18350	234

Die Werte für eine derartig aufgenommene Kurve des obigen Eisenringes enthält Tabelle 7. Fig. 12b giebt ein Bild der Kurve, aus dem man wiederum eine Übereinstimmung mit den früheren Beobachtungen ersehen kann.

Es ist hier $\frac{\alpha}{2} = \beta,$

also $$B_{\text{mittel}} = 392 \cdot \beta - 5{,}8 \; II.$$

Die für diese Methode nötige Versuchsanordnung ergiebt Fig. 13.

Fig. 12 b.

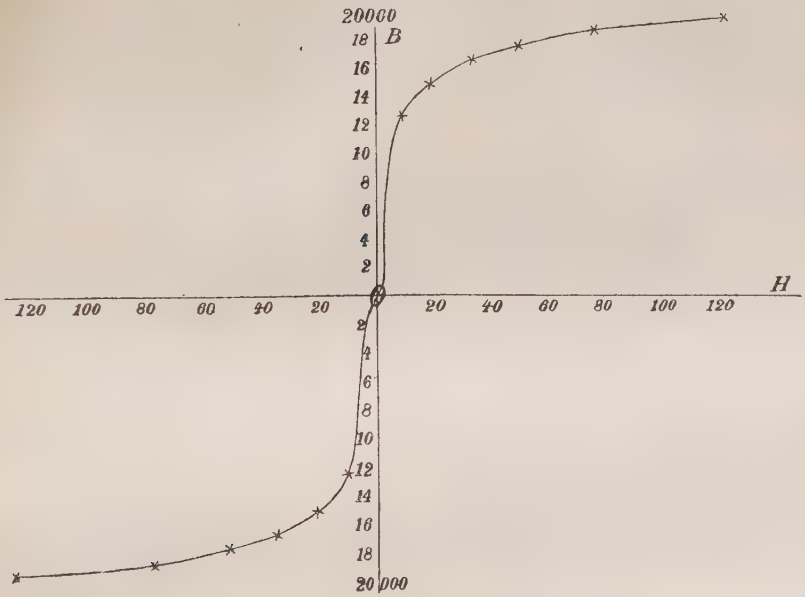
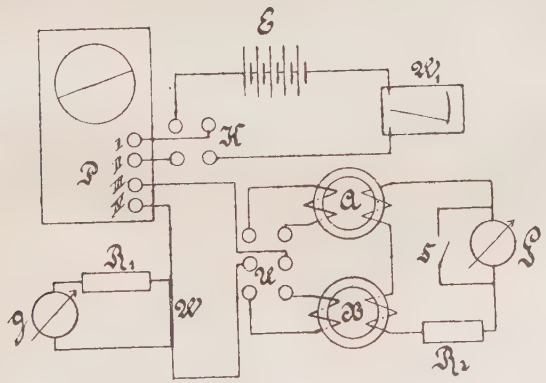


Fig. 13.



Man ersieht daraus, dafs sich diese Anordnung von der in Fig. 8 angegebenen nur durch die Einschaltung eines Kommutators K in den Gleichstromkreis der Akkumulatorenbatterie E unterscheidet.

Der Versuch selbst wurde in folgender Weise ausgeführt.

Während die Kurbel des Phasenrheostaten auf Segment 1 für gröfste Stromstärke stand, wurde der Kommutator K umgelegt und der Ausschlag α beobachtet. Darauf wurde die Kurbel auf Segment 13 geführt, in welchem Augenblicke die frühere gröfste Stromstärke in derselben Richtung vorhanden war. Nach Weiterdrehung der Kurbel auf Segment 14 wurde wieder kommutiert, der Ausschlag beobachtet, die Kurbel über Segment 1 und 2 auf Segment 3 geführt, der neue Ausschlag infolge des Kommutierens abgelesen und so fort, also nach jeder Bestimmung die Kurbel $12 + 1$ Segmente weitergeführt.

b. Auch die von Rowland angegebene Methode der Stromwendung mit allmählicher Abnahme des magnetisierenden Stromes liefse sich ohne weiteres mit dem Phasenrheostaten ausführen, ebenfalls mit dem Vorzuge, fehlerhafte Bestimmungen jederzeit wiederholen zu können. Die Versuchsordnung würde dieselbe wie die in Fig. 13 angegebene sein. Die Kurbel des Phasenrheostaten steht während jeder Beobachtung auf dem Segment 1 für maximale Stromstärke. Die Abnahme der Stromstärke wird durch einen Widerstand W_1 reguliert. Um irgend einen Punkt der Kurve nochmals bestimmen zu können, dreht man die Kurbel um 180^0, das Eisen befindet sich dann in demselben Zustande der Magnetisierung wie vor dem Versuche.

Bei vorstehend beschriebenen Methoden habe ich als Beispiele die Untersuchungen von ringförmig gewickelten Drähten angegeben. Für viele Fälle, insbesondere wenn es sich darum handelt, massive Eisenstücke zu untersuchen, würde es sehr unbequem sein, dieselben erst in Ringform zu bringen und für jeden Fall besonders zu bewickeln, obwohl die Prüfung in Ringform immer die zuverlässigste bleibt. Hier kann man nun das Eisen in Stabform in dem von Hopkinson angegebenen Schlufsjoche untersuchen, das aus möglichst weichem Eisen und von bedeutend gröfserem Querschnitte hergestellt sein mufs als das Prüfstück. Aber selbst unter der Voraussetzung, dafs das Prüfstück genau in die Bohrungen des Schlufsjoches eingepafst ist, mufs eine Korrektion des Resultates stattfinden, die nach Ewing[1]) aus der Formel hervorgeht

$$H = \frac{4\pi Z_2 i}{10 l_2} - \frac{B q_2 l_2'}{\mu_2 q_2' l_2},$$

worin aufser den bekannten Bezeichnungen l_2' die Weglänge der Kraftlinien im Joche, μ_2 die Permeabilität des Jocheisens und q_2' den Querschnitt der beiden Jochhälften bedeutet.

[1]) Ewing, Magn. Indukt., pag. 262.

Um sich bei allen Methoden — besonders wenn es sich darum handelt, viele Untersuchungen hinter einander zu machen — die Rechnungen bedeutend zu erleichtern, kann man in der Formel

$$B = \frac{4\pi Z_1 z_1 q_1 R_2}{z_2 \cdot 10 l_1 \cdot R_1 \cdot q_2} \cdot \frac{\beta}{\gamma}$$

die einzelnen Faktoren derartig wählen, dafs $B = 10^m \cdot \frac{\beta}{\gamma}$ wird, wo m irgend eine ganze Zahl bedeutet; ebenso kann man setzen $H = \frac{4\pi Z_2}{10 l_2} \cdot i = 10^n \cdot i$, wo n eine ganze Zahl bedeutet. Dann wird die Permeabilität $\mu = \frac{10^{m-n}}{i} \cdot \frac{\beta}{\gamma}$.

B. Methoden für raschen magnetischen Kreislauf, nur zur Untersuchung von sorgfältig unterteilten Prüfstücken geeignet.

Die nachfolgenden Methoden lassen sich nicht allein in der eingangs beschriebenen Weise mit dem Phasenrheostaten, sondern nach Anbringung einer besonderen Kontaktvorrichtung auch mit Hülfe jeder Wechselstrommaschine ausführen. Setzt man nämlich auf die Welle einer Wechselstrommaschine eine Hartgummischeibe, in deren Umfang ein schmales Stahlblech eingelassen ist, so kann man vermittelst einer Metallbürste, welche auf dem Umfange der Hartgummischeibe schleift, den Stromkreis eines empfindlichen Galvanometers in dem einen Augenblicke schliefsen, in welchem das Stahlblech die Bürste berührt. Der Galvanometerausschlag ist dann ein Mafs für die hindurchgeflossene Elektrizitätsmenge. Durch Veränderung der Bürstenstellung kann man dann die einer andern Stromphase entsprechende Elektrizitätsmenge ermitteln. Hopkinson[1]), Lydall und Wilson haben nach dieser zur Aufnahme der Wechselstromkurve längst bekannten Anordnung auch bereits magnetische Messungen gemacht, indem sie mit Hülfe eines Elektrometers die Spannung an den Enden der Primärwindungen einer Eisenuntersuchungsspule und an den Enden eines bekannten induktionsfreien Widerstandes während der verschiedenen Stromphasen ermittelten.

Hier möchte ich nun noch drei weitere Methoden geben, die wegen ihrer Einfachheit für Eisenuntersuchungen sehr geeignet erscheinen. Bei Anwendung eines Phasenrheostaten in der angegebenen Form ist es jedoch durchaus nötig, bei der Konstruktion desselben sämtliche Metallteile auf Marmor oder Schiefer zu setzen, da sich herausgestellt hat, dafs die von mir verwendete Eichenholzplatte,

[1]) Hopkinson, Lydall und Wilson, Lum. él. 48, p. 384. Elektr. Zeitschrift 1893, p. 449.

selbst wenn dieselbe mit Paraffin getränkt war, nicht genügend isolierte. Aus letzterem Grunde und weil mir eine passende Wechselstrommaschine nicht zur Verfügung stand, kann ich ausgeführte Beispiele zu diesen Methoden leider nicht geben.

4) Methode mit konstanten Galvanometerausschlägen.

Da die von dem Kontaktapparate des Phasenrheostaten oder der Wechselstrommaschine hervorgerufenen Stromstöfse für die betreffende Stellung der Schleifbürste stets gleicher Richtung sind, so wird ein Galvanometer von gröfserer Schwingungsdauer, als die Dauer zweier aufeinander folgender Stromstöfse beträgt, einen konstanten Ausschlag ergeben. Wenn man nun durch die Primärwindungen einer Eisenuntersuchungsspule einen Wechselstrom fliefsen läfst, so kann man mit Hülfe des Kontaktapparates einmal die in einem bestimmten Augenblicke herrschende Stromstärke ermitteln, indem man das Galvanometer an die Enden eines im Hauptstromkreise liegenden bekannten Widerstandes schaltet und zweitens die Induktion in der Sekundärspule, welche ein Mafs für die im Eisen erzeugten Kraftlinien ist, feststellen.

Es sei C die Konstante des Galvanometers für Strommessung, dann ist $J = C \cdot \alpha$, wenn J die zu messende Stromstärke und α den erzeugten Ausschlag bedeuten. C wird am besten mit Hülfe einer bekannten elektromotorischen Kraft E^1, in deren Stromkreis der Kontaktapparat eingeschaltet ist, bestimmt. Nehmen wir an, dafs die Anzahl der Stromschliefsungen des Kontaktapparates pro Sekunde stets dieselbe bleibt, so gilt auch hier:

$$J^1 = \frac{E^1}{R^1} = C \cdot \alpha^1,$$

$$C = \frac{E^1}{R^1 \cdot \alpha^1},$$

wenn J^1 die Stromstärke, R^1 den Widerstand und α^1 den Galvanometerausschlag bezeichnen.

Daraus folgt

$$J = \frac{E^1}{R^1 \cdot \alpha^1} \cdot \alpha.$$

Um nun Rechnungen zu sparen, bestimmen wir den Reduktionsfaktor G des Galvanometers für die Messung der im Eisen erzeugten Kraftlinien mit Hülfe einer bekannten Induktionsspule. Unter Beibehaltung der früheren Bezeichnungen erhalten wir, wie Seite 18 nachgewiesen,

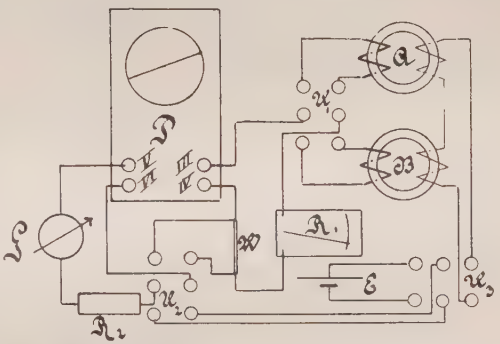
$$G = \frac{4\pi Z_1 z_1 q_1 R_2}{z_2 \cdot 10 l_1 \cdot R_1 \cdot \gamma},$$

dann ist die gesamte Kraftlinienzahl $N = G \cdot \beta$:

$$B = \frac{N}{q_2} = \frac{G \cdot \beta}{q_2} = \frac{4\pi Z_1 z_1 q_1 R_2}{z_2 \cdot 10 l_1 \cdot R_1 \cdot \gamma q_2} \cdot \beta.$$

Die Versuchsanordnung zeigt Fig. 14. An den Wechselstromklemmen *III* und *IV* liegt der Hauptstromkreis, in den ein bekannter Widerstand W, ein Rheostat R_1 und ein Umschalter u_1 eingeschaltet sind. Mit Hülfe des letzteren kann man den Strom entweder durch die Induktionsspule A oder durch die Eisenprüfspule B fliefsen lassen. An die Klemmen *V* und *VI* des Kontaktapparates ist ein Galvanometer G nebst Stöpselrheostat R_2 und Umschalter u_2 angeschaltet, welcher das Galvanometer entweder an die Enden des Widerstandes W oder an den Umschalter u_3 zu legen gestattet. Mit Hülfe des letzteren vermag man wiederum das Galvanometer einmal an die Induktionswindungen in A und B und zweitens an die bekannte elektromotorische Kraft E anzuschliefsen.

Fig. 14.



Der Gang eines Versuches ist nun folgender:

Zur Bestimmung von C ist der Umschalter u_2 auf u_3 und dieser auf E gelegt.

Zur Bestimmung von G bleibt u_2 in seiner Lage, u_1 wird auf die Induktionsspule A, u_3 auf die hintereinander geschalteten Induktionswindungen der Spulen A und B gelegt.

Nun beginnt die Eisenuntersuchung, indem u_1 bei unveränderter Lage von u_2 und u_3 auf die Eisenprüfspule B umgeschaltet wird. Durch veränderte Stellung der Schleifbürste des Kontaktapparates kann man dann die den Stromstärken des Primärkreises, die durch Umlegen von u_2 auf W ermittelt werden, entsprechenden magnetischen Induktionen bestimmen.

Inwieweit die Selbstinduktion des Galvanometerkreises für die Genauigkeit der Strommessung in Frage kommt, mufs in jedem Falle ermittelt werden, doch läfst sich dieselbe so klein machen, dafs die Zeitkonstante des Galvanometerkreises vernachlässigt werden kann.

5) Methode mit Kompensation durch eine bekannte Induktionsspule.

Wenn man die Stärke eines Stromes, welcher die Primärwindungen einer Induktionsspule und einer Eisenprüfspule hintereinander durchfliefst, plötzlich ändert, so verhalten sich die in den Sekundärwindungen z_1 und z_2 erzeugten elektromotorischen Kräfte wie die Änderung der Kraftlinienzahl in beiden Spulen:

$$E_1 : E_2 = z_1 N_1 : z_2 N_2.$$

Wir hatten nun ermittelt (siehe Seite 17), dafs für die früher benutzte Induktionsspule die Anzahl der von i Amp. Stromstärke erzeugten Kraftlinien

$$N_1 = \frac{4\pi Z_1 i}{10 l_1} \cdot q_1$$

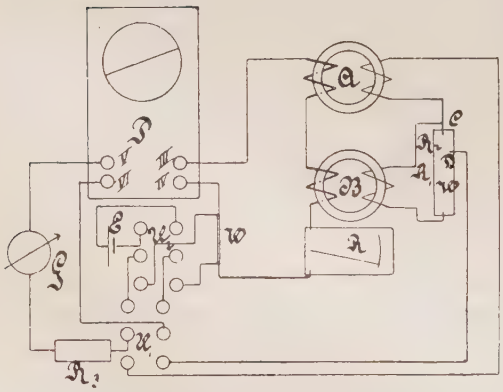
ist. Daraus folgt aber

$$N_2 = \frac{4\pi Z_1 i E_2 z_1}{10 l_1 E_1 z_2} \cdot q_1$$

oder

$$B = \frac{N_2}{q_2} = \frac{4\pi Z_1 z_1 q_1 E_2}{10 l_1 z_2 q_2 E_1}.$$

Fig. 15.



Es sei nun in Fig. 15 die Sekundärwindung B der Eisenprüfspule durch einen Widerstand W geschlossen. In zwei Punkten C und D dieses Widerstandes sei die Sekundärwindung der Induktionsspule A nebst Galvanometer G so angelegt, dafs die entstehenden Induktionsströme einander entgegengerichtet sind. Ist dann R_1 der Gesamtwiderstand der Spule B und des Widerstandes W, R_2 der zwischen den Punkten C und D liegende Widerstand, J die Stromstärke des Induktionsstromes in der Eisenprüfspule, so wird für den Fall, dafs durch Änderung von R_2 das Galvanometer und die Induktionsspule stromlos geworden sind,

$$E_1 = J \cdot R_2 = \frac{E_2}{R_1} \cdot R_2,$$

also

$$B = \frac{4\pi Z_1 z_1 q_1 i R_1}{10 l_1 q_2 z_2 R_2} - \frac{(q_2' - q_2) H}{q_2}.$$

Ein Beispiel möge dieses erläutern: Die in Methode 1 (siehe Seite 17) verwendete Induktionsspule war mit der Eisenprüfspule in einen Stromkreis geschaltet, die Sekundärwindungen in der angedeuteten Weise verbunden. Ein Strom von 3,45 Amp. wurde in der Primärspule umgekehrt und der Widerstand R_2 so lange vermindert, bis dafs das Galvanometer in Ruhe blieb.

Dann war $R_1 = 31{,}7 \qquad R_2 = 8{,}33.$

Daraus folgt $$\frac{E_2}{E_1} = \frac{R_1}{R_2} = \frac{31{,}7}{8{,}33}$$

oder $$B = \frac{4\pi \cdot 512 \cdot 1000 \cdot 5{,}37 \cdot 3{,}45}{10 \cdot 31{,}4 \cdot 100 \cdot 0{,}79} \cdot \frac{31{,}7}{8{,}33} - 5{,}8\,H,$$

$$B = 17\,860,$$

$$H = 70{,}6,$$

$$\mu = \frac{B}{H} = 253.$$

Diese Werte stimmen mit den in Tabelle 3 gefundenen gut überein. Die Selbstinduktion der Sekundärspulen war ohne Bedeutung. Das Galvanometer blieb beim Kommutieren des Stromes vollständig in Ruhe. Fig. 15 giebt die Anordnung der Kompensationsspule für die Messung mit Wechselstrom von grofser Periodenzahl.

Die Primärwindungen der Induktionsspule A und der Eisenprüfspule B sind mit dem Rheostaten R und dem bekannten Widerstande W in den Hauptstromkreis geschaltet. Die Sekundärwindungen der Spule B sind durch den Rheostaten R_1 geschlossen. Das eine Ende der Sekundärwindungen der Spule A ist direkt, das andere unter Zwischenschaltung eines Teiles CD des Rheostaten R_1 an den Umschalter u_1 gelegt. Mit Hülfe des letzteren kann einerseits die Sekundärwindung in den Galvanometerkreis, der auch den Kontaktapparat enthält, geschaltet werden zur Bestimmung der Induktion, anderseits zwecks Strommessung im Primärkreise an den Umschalter u_2, der wiederum entweder an die bekannte elektromotorische Kraft E zwecks Aichung des Galvanometers oder an den Widerstand W gelegt werden kann.

6) Methode mit Kompensation durch eine konstant wirkende elektromotorische Kraft.

Die im Augenblicke des Stromschlusses durch den Kontaktapparat bestehende elektromotorische Kraft der Induktion läfst sich kompensieren durch irgend eine konstante Spannung nach den bekannten Methoden. Dann entspricht die elektromotorische Kraft E_1 der In-

duktionsspule einer Spannung $k_1 = J \cdot R_1$, die elektromotorische Kraft E_2 der Eisenprüfspule einer Spannung $k_2 = JR_2$, folglich

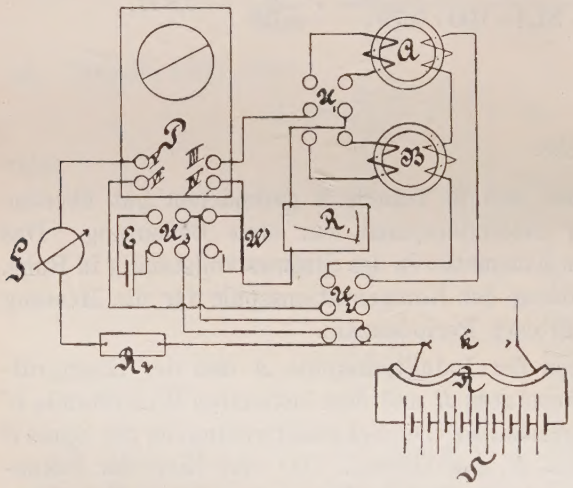
$$E_2 : E_1 = R_2 : R_1.$$

Es ist dann, wie in der vorigen Methode,

$$B = \frac{4\pi Z_1 z_1 q_1 i R_2}{10 l_1 \cdot q_2 z_2 R_1} - \frac{q_2^1 - q_2}{q_2} \cdot H.$$

Diese Methode bietet nun noch den Vorteil, dafs man auch die Stromstärke des Primärkreises durch Kompensation der Spannung an den Enden eines bekannten, vom Strome durchflossenen Widerstandes W ermitteln kann, und dadurch, dafs der Galvanometerkreis nun stromlos wird, auch alle Fehler infolge von Selbstinduktion zu meiden vermag.

Fig. 16.



Die Schaltung ist aus Fig. 16 ersichtlich. Der Umschalter u_1 läfst einmal den Primärstrom durch A, ein anderes Mal durch B fliefsen. Die erzeugten elektromotorischen Kräfte werden durch den Umschalter u_2 in den Galvanometerkreis geleitet und dort durch Veränderung des Widerstandes R, der von einem konstanten Strome durchflossen wird, mit Hülfe der Spannung k kompensiert. In gleicher Weise wird durch Umlegen von u_2 die Strommessung ausgeführt durch Bestimmung der Spannung an den Enden des Widerstandes W.

Zum Schlufs möchte ich noch der Firma Janfsen & Fügner in Hannover für die gute Ausführung des Phasenrheostaten und der übrigen Hülfsmittel hierdurch meinen besten Dank aussprechen.